

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب پین فیوز با بهره‌گیری از فیوزهای اصطکاکی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.73405.1074

محسن گرامی[۱]　　وحید اسکندریان[۲]

چکیده پین فیوز نوع جدیدی از فیوز سازه‌ای است که در محل تشکیل مفصل پلاستیک سازه فولادی، نصب می‌شود. فیوز مزبور در هنگام وقوع زلزله، از طریق لغزش دورانی سطوح فولادی نسبت به یکدیگر عمل نموده، وجود نیروی اصطکاک بین صفحات فیوز، موجب اتلاف انرژی زلزله می‌شود. قاب مهاربندی‌شده پین فیوز، یک قاب خمشی مهاربندی‌شده ویژه بوده که اتصال خمشی آن از نوع پین فیوز بوده و مهاربند قطری آن دارای فیوز اصطکاکی است که مانع کمانش مهاربند می‌شود. در این تحقیق، ابتدا در قیاس بامطالعه آزمایشگاهی قاب مهاربندی‌شده پین فیوز، صحت سنجی انجام شد. در ادامه بر مبنای صحت سنجی صورت گرفته، ۳ قاب فولادی مهاربندی‌شده پین فیوز (قاب ٦، ۹ و۱۲ طبقه) طراحی شدند. همچنین قاب های مشابهی از نوع قاب خمشی ویژه بااتصال RBS و مهاربند همگرای ویژه طراحی شدند تا عملکرد لرزه‌ای دو گروه قاب با همدیگر مقایسه شود. درنهایت، ٤۲ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی دو گروه قاب با استفاده از هفت شتاب‌نگاشت مقیاس شده (حوزه نزدیک به‌صورت دوبعدی) با نرم‌افزار اپنسیس صورت گرفت و نتایج تحلیل غیرخطی دو گروه قاب مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحلیل صورت گرفته نشان داد که قاب مهاربندی‌شده پین فیوز، عملکرد بسیار بهتری در مقابل قاب مهاربندی‌شده ویژه، ازلحاظ اتلاف انرژی زلزله به‌واسطه فعال شدن فیوزهای اصطکاکی (فعال‌شدن ٦۰ درصدی فیوزهای تیر و ۸۵ درصدی فیوزهای مهاربند) دارد .مزیت دیگر قاب مهاربندی‌شده پین فیوز، تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی ۸۰ درصدی و کاهش قابل‌توجه هزینه تعمیرات بعد از وقوع زلزله است.

واژه‌های کلیدی فیوز اصطکاکی، سیستم پین فیوز، قاب پین فیوز.

Evaluation of the Seismic Performance of Braced Pin Fuse Frame Using Friction

Mohsen Gerami　　Vahid Eskandarian

Abstract Pin Fuse is a new type of structural fuse that is installed at the place of plastic hinge of steel structure. The fuse acts through rotational sliding of steel surfaces on each other during an earthquake. The presence of frictional force between the fuse plates causes the loss of seismic energy. Pin fuse frame is a special braced moment frame that its moment connection is of pin fuse and its diagonal brace has a friction fuse which prevents buckling of the brace. In this study, first in comparison with full scale test of pin fuse frame was validated. Afterward, based on the verification, three braced steel frame of the pin fuse at six, nine and twelve story were designed. Also, similar frames of special moment with RBS connection and special diagonal brace was designed to compare the seismic performance of the two groups frames. Finally, 42 nonlinear time history analysis of the two frame was performed with opensees software in two dimensions using seven scaled Earthquake acceleration (Near fault) and the results of nonlinear analysis of the two frames were compared. The results of the analysis showed that the pin fuse frame has a much better performance than the special braced frame in terms of seismic energy loss due to the activation of friction fuses(activation of 60% of beam fuses and 85% of brace fuses). Another advantage of the braced pin fuse frame is the supplying of 80% of life safety performance level and significantly reducing the repair cost after an earthquake.

Key Words Friction Fuse , Pin Fuse System , Braced Pin Fuse Frame

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۸/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/٤/۲۰می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استاد گروه آموزشی عمران – زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: mgerami@semnan.ac.ir

مقدمه

یکی از روش‌های کاهش خسارات ناشی از زلزله در سازه‌ها، متمرکز ساختن خرابی‌ها در اعضایی از پیش تعیین‌شده است[1]. این اعضاء به‌صورت فیوز(Fuse) در سازه‌ها به‌منظور استهلاک انرژی از طریق تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی طراحی می‌شوند[2]. سایر اعضای سازه، برای اینکه در زمان وقوع زلزله در شرایط ارتجاعی باقی بمانند، با استفاده از ضرایبی مثل .Ω در آیین‌نامه AISC ۳٤۱-۰۵ (۲۰۰۵) [3] و در استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم-۱۳۹۸)[4]، با نیروی تشدید یافته زلزله طراحی می‌شوند [2].

مهاربند کمانش تاب، میراگرهای تسلیمی، تیر پیوند قاب دارای مهاربند واگرا، اتصال خمشی RBS (Reduced beam section)، نمونه‌هایی از فیوزهای سازه‌ای هستند. اگرچه فیوز سازه‌ای منجر به متمرکز شدن خسارت در محل فیوز و کاهش آسیب وارده به سازه می‌شوند؛ اما یکی از عیوب فیوزها، همین تمرکز خسارت در محل فیوز است که باعث می‌شود در زمان بازسازی، کل فیوز تعویض شود که این کار تقریباً غیرممکن و دشوار است [5]. برای حل مشکل بیان‌شده، برخی از انواع فیوزهای سازه‌ای به‌گونه‌ای طراحی شدند که قادر به اتلاف انرژی زلزله بدون ایجاد خسارت هستند. میراگرهای اصطکاکی نمونه بارز این نوع از فیوزها می‌باشند. سیستم میراگر اصطکاکی پال که در سال ۱۹۸۲ که توسط پال (Pall) و همکارانش ارائه گردید، اولین نمونه از میراگرهای اصطکاکی می‌باشد که در محل تقاطع مهاربندهای ضربدری قرار می‌گیرد[6] که باعث بهبود ضریب رفتار سازه می‌گردد[7]. هم‌چنین پوپوف (Popov) و همکاران در سال ۱۹۹۳ اتصال اصطکاکی SBC (Slottedbolted connection) را معرفی کردند که یک میراگر اصطکاکی قابل‌استفاده در طول مهاربند می‌باشد[8]. اتصال اصطکاکی FDD (Friction damper device) که توسط ماولا (Mualla) و همکاران در سال ۲۰۰۲ معرفی شد، یک میراگر اصطکاکی دورانی می‌باشد که در مهاربندهای شورون (Chevron) کاربرد دارد[9]. استفاده از میراگر اصطکاکی موجب کاهش انتقال انرژی زلزله به سازه می‌شود[10]، لذا می‌توان از میراگرهای اصطکاکی در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و یا افزایش سطح عملکرد آنها استفاده کرد[11].

مارک سرکیسیان (Mark sarkisian) اتصال پین فیوز را در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد کرد که درواقع یک نوع فیوز (میراگر) اصطکاکی است[12]. اتصال پین فیوز،یک اتصال نیمه صلب تیر- ستون است که در قابهای فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دراتصال پین فیوز شکل (۱) اتلاف انرژی زلزله از طریق یک مفصل لغزشی- اصطکاکی رخ می‌دهد[13]. درواقع لغزش به‌عنوان فیوز سختی عمل می‌کند و باعث آزاد شدن سختی می‌شود. چنین لغزشی می‌تواند در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فولادی و کاهش خسارت بسیار مؤثر باشد [14] مزیت اتصال پین فیوز نسبت به سایر فیوزهای سازه ای مانند اتصال RBS ، شکل‌پذیری بالای اتصال و کاهش هزینه‌های تعمیرات به دلیل قرار داشتن اتصال پین فیوز در ناحیه خطی در هنگام وقوع زلزله است [14]. همچنین از اتصال پین فیوز می‌توان در سازه های چوبی برای تحمل نیروی زلزله استفاده نمود [16]. در این تحقیق عملکرد لرزه ای قاب پین فیوز با سیستم های مقاوم رایج (قاب خمشی مهاربندی شده ویژه) مقایسه شده است که کمتر به این موضوع پرداخته شده است.

قاب پین فیوز

قاب پین فیوز یک قاب فولادی است که با مهاربند همگرا در دهانه شکل(۲) ترکیب‌شده‌است. اتصال تیر- ستون در قاب مزبور از نوع اتصال پین فیوز است که در قسمت قبل توضیح داده شد. مهاربند قاب به دو بخش تقسیم‌شده‌است که توسط یک فیوز اصطکاکی لغزشی به هم وصل شده‌است و اجازه می‌دهد هر بخش در طول یک رویداد لرزه‌ای بزرگ به سمت یا دور از یکدیگر حرکت کند قاب پین فیوز یک سیستم فیوز اصطکاکی انحصاری است که سختی و کارایی قاب‌های مهاربندی‌شده را با رفتار شکل‌پذیر قاب‌های خمشی ترکیب می‌کند [12].

مطالعه آزمایشگاهی قاب پین فیوز در دانشگاه کالیفرنیا، سن‌دیه‌گو (University of California, San Diego) ، توسط سرکیسیان و همکاران انجام شد [12]. نمونه آزمایش با عرض ۲۰ فوت و ارتفاع ۱۲ فوت با ستون با مقطع W۱٤×۱۳۲، تیرها با مقطع W۱٦×۵۷ و مهاربند با مقطع "HSS ٦×٦×۰/۳۷۵ ساخته شد [12]. پیکربندی نمونه بر اساس اندازه واقعی قاب برای یک سازه بناشده بود. برای تأمین نیروی پیش تنیدگی موردنیاز فیوزها، از پیچ‌های با مقاومت بالا و واشرهای DTI

(Direct tension indicator) استفاده شد [12]. شکل (۳) پلان جانمایی نمونه و تجهیزات آزمون را نشان می‌دهد.

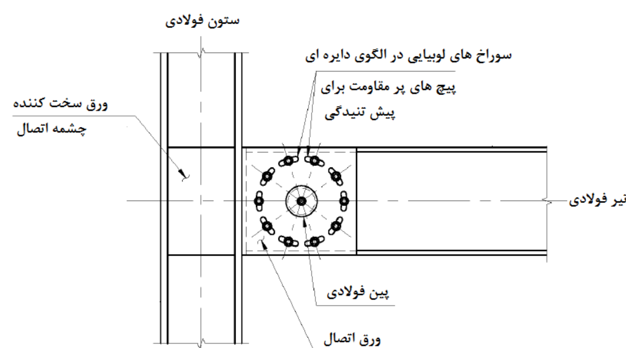
پروتکل بارگذاری بر اساس ضمیمه S آیین‌نامه ۰۵-AISC ۳٤۱ انتخاب شد[12]. در حین آزمایش ابتدا فیوز مهاربند دچار لغزش شد و متعاقب آن لغزش چرخشی اتصالات خمشی پین فیوز قاب صورت گرفت. هیچ تسلیم یا تغییر شکل قابل‌توجهی تا دریفت (drift) ٪۵ مشاهده نشد[12]. در دریفت ٪۶، مهاربند دچار کمانش درون صفحه‌ای تحت بار فشاری شد. کمانش در طول وسیعی از مهاربند فراتر از محل فیوز مهاربند رخ داد. افزایش مقاومت قابل‌توجهی در دریفت ٪٦ به‌دلیل قفل شدن فیوز مهاربند مشاهده شد. قاب پین فیوز، ثابت کرد که قادر به تحمل تغییر مکان‌های بسیار زیاد بدون از دست دادن مقاومت است؛ بنابراین به همراه مقاومت در برابر بار جانبی، قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری را فراهم می‌کند [12].

صحت‌سنجی

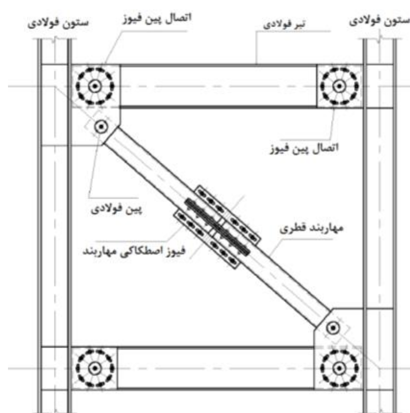
در این تحقیق ابتدا صحت‌سنجی مطالعه آزمایشگاهی قاب پین فیوز صورت پذیرفت تا بر مبنای آن مدل‌سازی صحیح قاب‌های مدنظر در برنامه اپنسیس انجام شود. مبنای صحت‌سنجی، مطالعه آزمایشگاهی صورت‌گرفته بر روی قاب پین فیوز توسط سرکیسیان و همکارانش[12] می‌باشد. ابعاد و مقاطع مدل عددی، همان ابعاد و مقاطع مطالعه آزمایشگاهی انتخاب شد. برای مدل نمودن فیوزهای اصطکاکی تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک، ابعاد پروفیل فیوز به‌گونه‌ای انتخاب شد که لنگر پلاستیک آن، ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر قاب باشد [12]. برای مدل‌سازی فیوز مهاربند نیز، ابعاد پروفیل فیوز به‌گونه‌ای انتخاب شد که با رسیدن نیرو در مهاربند به ۸۵ درصد ظرفیت کمانشی آن، جاری شود [12]. با توجه به موارد بیان‌شده، مقطع فیوز تیر W۱٦×٤۵ و مقطع فیوز مهاربند "HSS ٤×٤×۰/۱۸۸ به دست آمد.

برای صحت‌سنجی و تحلیل تاریخچه زمانی در این تحقیق از نرم‌افزار اپنسیس [17] (Opensees) استفاده شد. برای مدل کردن فیوزهای قاب از المان غیرخطی و ماده فولاد نوع ۰۲ اپنسیس استفاده شد. بقیه اعضای قاب به‌صورت خطی و الاستیک (Elastic) مدل شدند. برای اینکه رفتار فیوزهای قاب شبیه رفتار فیوز اصطکاکی شود، نسبت سخت‌شوندگی کرنشی فیوز اصطکاکی اتصال تیر- ستون، بسیار کم و برابر 10^{-6} در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای مدل کردن فیوز اصطکاکی لغزشی مهاربند، نسبت سخت‌شوندگی کرنشی فیوز مهاربند برابر 5×10^{-6} در نظر گرفته شد. نحوه بارگذاری چرخه‌ای قاب مشابه مطالعه آزمایشگاهی می‌باشد. درنهایت پس از تحلیل قاب، منحنی لنگر - دوران فیوز اصطکاکی تیر قاب (شکل ٤) ترسیم شد و به‌منظور صحت‌سنجی با نتایج مطالعه آزمایشگاهی [12] مقایسه شد.

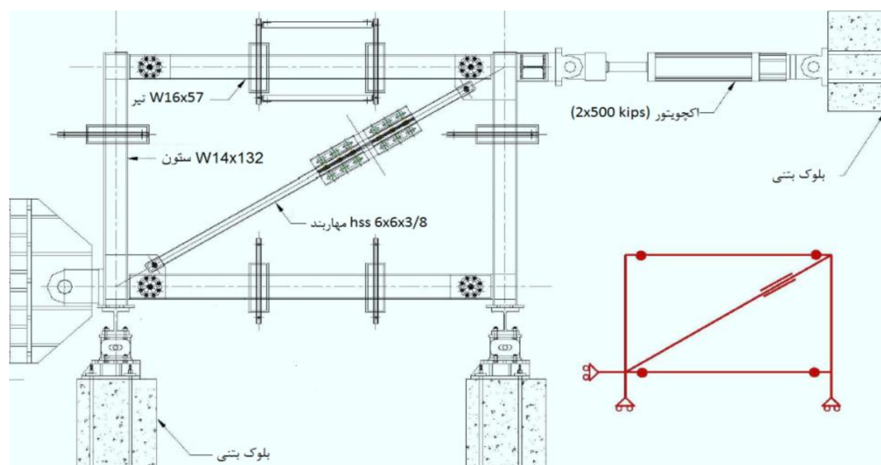
در شکل (٤) منحنی آبی‌رنگ مربوط به تحلیل عددی و منحنی قرمزرنگ مربوط به مطالعه آزمایشگاهی [12] است. در جدول (۱) مقادیر سختی دورانی فیوز اصطکاکی تیر در تحلیل عددی و مطالعه آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت که نشان‌دهنده کاهش ٦/۹ درصدی سختی دورانی نهایی فیوز خمشی قاب در تحلیل عددی نسبت‌به مطالعه آزمایشگاهی است. ضمناً رفتار دندانه‌ای‌شکل مطالعه آزمایشگاهی به‌دلیل رفتار سطوح اصطکاکی (لغزش لحظه‌ای) فیوز در حین مطالعه آزمایشگاهی می‌باشد [12] که این رفتار به‌دلیل پیچیدگی، قابل مدل کردن در اپنسیس نیست.



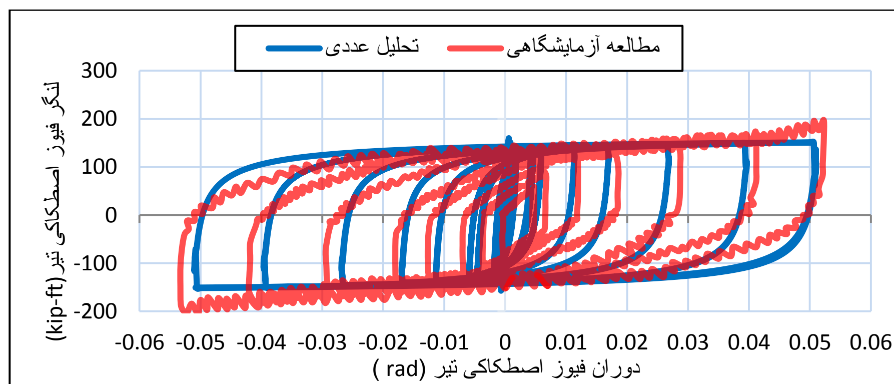
شکل ۱ اتصال پین فیوز [12]



شکل ۲ قاب پین فیوز[12]



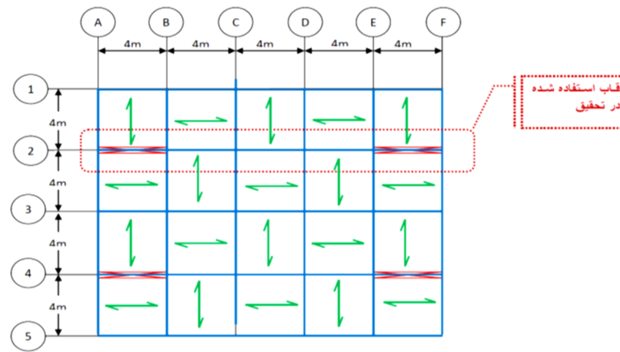
شکل ۳ پلان جانمایی نمونه و تجهیزات آزمون [12]



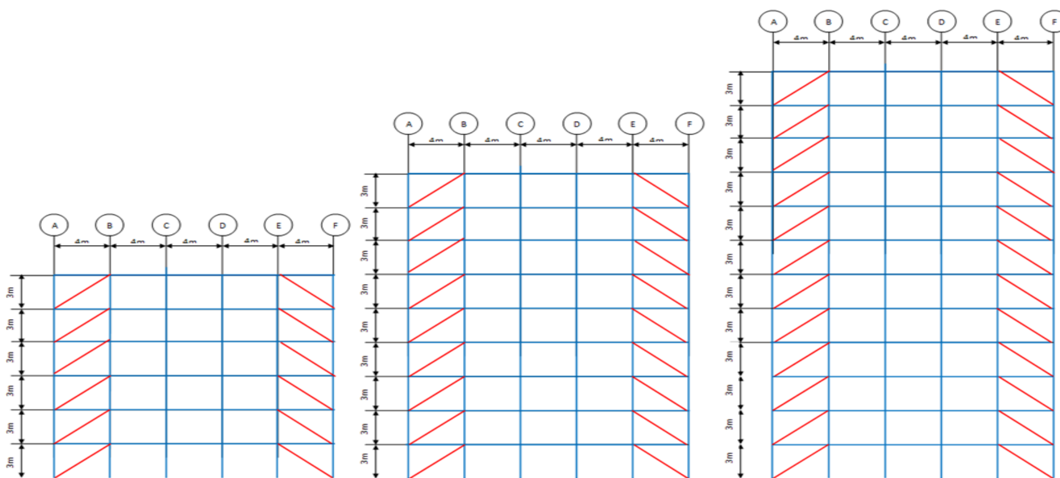
شکل ٤ مقایسه نمودارهای لنگر- دوران فیوز اصطکاکی تیر، بر اساس مطالعه آزمایشگاهی [12] و تحلیل عددی

جدول ۱ مقایسه سختی دورانی فیوز اصطکاکی تیر

	چرخش نهایی فیوز (rad)	لنگر نهایی فیوز (kip-ft)	سختی دورانی فیوز $k = \frac{\text{لنگرفیوز}}{\text{چرخش فیوز}}$ برحسب (kip-ft/rad)
تحلیل عددی	۰/۰٤۹٥	۱٥۲	۳۰۷۰/۷۰
مطالعه آزمایشگاهی [12]	۰/۰٥۳	۱۷٥	۳۳۰۱/۸٦
کاهش سختی تحلیل عددی نسبت‌به مطالعه آزمایشگاهی (درصد)			٦/۹



شکل ۵ موقعیت قاب خمشی مورداستفاده برای تحقیق در پلان



شکل ٦ هندسه قاب های خمشی مورد استفاده برای تحقیق

طراحی قاب‌های تحقیق

بعد از صحت‌سنجی مطالعه آزمایشگاهی، قاب‌های مدنظر در تحقیق که در پلان زیر (شکل ۵) مشخص‌شده‌است، بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم –۱۳۹۸)[4] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان(۱۳۹۲) [18]، طراحی شد. سازه مزبور در ۹ طبقه بر روی زمین نوع II ساخته‌شده‌است. سازه بر طبق فرض‌های تحقیق، در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد واقع است. در راستای افقی پلان، تنها قاب‌های شماره ۲ (قاب استفاده شده در تحقیق) و ٤ از نوع قاب خمشی با مهاربند بوده و قاب‌های شماره ۱ و ۳ و ۵ از نوع قاب ساده با اتصالات مفصلی هستند.

قاب‌های مورداستفاده در تحقیق، سه قاب خمشی شش، نه و دوازده طبقه پنج دهانه است و در دو دهانه آن، مهاربند همگرا وجود دارد که هندسه آن در شکل (٦) نشان داده شده‌است. در سه قاب خمشی اول تحقیق، اتصال خمشی قاب از نوع فیوز اصطکاکی دورانی پین فیوز است و مهاربند همگرای آن دارای فیوز اصطکاکی لغزشی می‌باشد. در سه قاب خمشی دوم تحقیق نیز، از نوع قاب خمشی ویژه با مهاربند همگرای ویژه است. شش قابی که در تحقیق مورد تحلیل قرار می‌گیرند، بر طبق بند ۱-۸-٤ استاندارد ۲۸۰۰ از نوع سیستم دوگانه یا ترکیبی است و بر همین مبنا، قاب خمشی بدون مهاربند باید قادر به تحمل ۲۵ درصد نیروی زلزله و مهاربند قاب نیز قادر به تحمل ۵۰ درصد نیروی زلزله به‌طور مستقل باشد [4]. همچنین برای طراحی ستون‌ها در هنگام اعمال بار جانبی زلزله به قاب بر اساس بند ۱۰-۳-۲-٤ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان[18]، از بار زلزله تشدید یافته (Ω×E) استفاده می شود. بعد از انجام محاسبات، مقاطع تیرها و ستون‌ها و مهاربندهای قاب به‌دست می‌آید که در جدول (۲) و جدول (۳) آمده‌است.

مدل‌سازی

باتوجه‌به اینکه دو قاب مورداستفاده، ساختار متفاوتی در بخش فیوزها نسبت‌به یکدیگر دارند. به‌طور جداگانه هرکدام از قاب‌ها، در برنامه اپنسیس مدل شدند. برای مدل کردن قاب پین فیوز مشابه صحت‌سنجی عمل شد و فیوز با المان غیرخطی و ماده فولاد نوع ۰۲ مدل شد. نسبت سخت‌شوندگی کرنشی فیوزها برای کنترل جابه‌جایی قاب و تفاوت بارگذاری صحت‌سنجی با بارگذاری قاب‌های تحقیق، بیشتر از مدل صحت‌سنجی ($۵×۱۰^{-۳}$) در نظر گرفته شد.

برای مدل کردن اتصال RBS قاب مهاربندی ویژه از ماده بیلین تعریف‌شده در اپنسیس استفاده شد [17]. از المان با طول صفر در اتصال RBS استفاده شد. مهاربند به‌صورت دوبخشی تعریف شد و نقطه میانی مهاربند انحراف جزئی داده شد تا پدیده کمانش مهاربند در هنگام بارگذاری زلزله رخ دهد.

برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از هفت شتاب‌نگاشت مقیاس شده حوزه نزدیک استفاده شد. شتاب‌نگاشت‌هایی که در این تحقیق مورداستفاده قرار گرفته‌است، از شبکه شتاب‌نگاری زلزله ایران [19] دریافت شده‌است. مشخصات زلزله‌های انتخاب‌شده درجدول (٤) نشان داده‌شده‌است. برای ترسیم طیف طرح مورد استفاده در مقیاس کردن شتاب‌نگاشت از بند ٤-۲ پیوست دوم استاندارد ۲۸۰۰ [4] استفاده شد.

جدول ۲ مقاطع تیرها و ستون‌های قاب

	قاب ٦ طبقه		قاب ۹ طبقه		قاب ۱۲ طبقه	
طبقه	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر
۱	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۸۰	IPE۳۰۰
۲	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۸۰	IPE۳۰۰
۳	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۸۰	IPE۳۰۰
٤	IPB۲۰۰	IPE۲٤۰	IPB۲۲۰	IPE۲۷۰	IPB۲۸۰	IPE۳۰۰
٥	IPB۱۸۰	IPE۲۲۰	IPB۲۰۰	IPE۲۷۰	IPB۲٦۰	IPE۳۰۰
٦	IPB۱٦۰	IPE۱۸۰	IPB۲۰۰	IPE۲٤۰	IPB۲٦۰	IPE۳۰۰
۷			IPB۱۸۰	IPE۲٤۰	IPB۲٤۰	IPE۲۷۰
۸			IPB۱٦۰	IPE۲۲۰	IPB۲٤۰	IPE۲۷۰
۹			IPB۱٤۰	IPE۲۲۰	IPB۲۲۰	IPE۲٤۰
۱۰					IPB۲۰۰	IPE۲٤۰
۱۱					IPB۱۸۰	IPE۲۲۰
۱۲					IPB۱٦۰	IPE۱۸۰

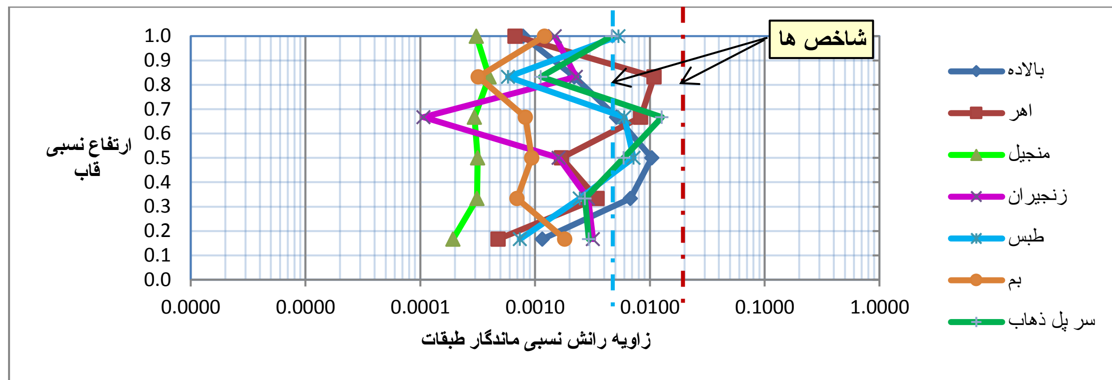
برای اینکه مقایسه تحلیل غیرخطی دو گروه قاب منطقی باشد. مقاطع تیرها و ستون‌های هر دو گروه قاب یکسان و بر اساس مقاطع به‌دست‌آمده درجدول (۲) است. در مورد قاب پین فیوز، مقاطع فیوز مهاربند قاب، به‌دلیل سختی دورانی پایین‌تر فیوز خمشی پین فیوز نسبت‌به اتصال خمشی قاب ویژه، قوی‌تر انتخاب شدند جدول (۳) و مقاطع مهاربند نیز، به‌منظور پیشگیری از کمانش آن، خیلی قوی‌تر جدول (۳) انتخاب شدند.

جدول ۳ مقاطع مهاربندها در قاب‌های تحقیق

	قاب ٦ طبقه			قاب ۹ طبقه			قاب ۱۲ طبقه		
	ویژه	پین فیوز		ویژه	پین فیوز		ویژه	پین فیوز	
طبقه		فیوز مهاربند	مهاربند		فیوز	مهاربند		فیوز مهاربند	مهاربند
۱	□ ۸۰ ×	□ ۱۰۰ × ٥	□ ۲٥۰ ×	□ ۹۰ ×	□ ۱۲۰ ×	□ ۲٥۰ ×	□ ۱۲۰	□ ۱۲۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱٦
۲	□ ۸۰ ×	□ ۱۰۰ × ٥	□ ۲٥۰ ×	□ ۹۰ ×	□ ۱۲۰ ×	□ ۲٥۰ ×	□ ۱۲۰	□ ۱۲۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱٦
۳	□ ۸۰ ×	□ ۱۰۰ × ٥	□ ۲٥۰ ×	□ ۹۰ ×	□ ۱۲۰ ×	□ ۲٥۰ ×	□ ۱۲۰	□ ۱۲۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱٦
٤	□ ۷۰ ×	□ ۹۰ × ٤	□ ۲٥۰ ×	□ ۸۰ ×	□ ۱۰۰ ×	□ ۲٥۰ ×	□ ۱۰۰	□ ۱۰۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱٦
٥	□ ۷۰ ×	□ ۹۰ × ٤	□ ۲٥۰ ×	□ ۸۰ ×	□ ۱۰۰ ×	□ ۲٥۰ ×	□ ۱۰۰	□ ۱۰۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱۰
٦	□ ۷۰ ×	□ ۹۰ × ٤	□ ۲٥۰ ×	□ ۸۰ ×	□ ۱۰۰ ×	□ ۲٥۰ ×	□ ۱۰۰	□ ۱۰۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱۰
۷	مقطع مهاربندها از قوطی گرم تولید شده بدون درز است			□ ۷۰ ×	□ ۹۰ ×	□ ۲٥۰ × ۸	□ ۸۰ ×	□ ۸۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱۰
۸				□ ۷۰ ×	□ ۹۰ ×	□ ۲٥۰ × ۸	□ ۸۰ ×	□ ۸۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۱۰
۹				□ ۷۰ ×	□ ۹۰ ×	□ ۲٥۰ × ۸	□ ۸۰ ×	□ ۸۰ × ٥	□ ۲٥۰ × ۸
۱۰							□ ۷۰ ×	□ ۷۰ × ٤	□ ۲٥۰ × ۸
۱۱							□ ۷۰ ×	□ ۷۰ × ٤	□ ۲٥۰ × ۸
۱۲							□ ۷۰ ×	□ ۷۰ × ٤	□ ۲٥۰ × ۸

جدول ٤ مشخصات زلزله انتخاب‌شده برای تحلیل تاریخچه زمانی [19]

زلزله	مدت‌زمان وقوع زلزله (ثانیه)	بزرگی زلزله (ریشتر)	PGA(g)	گام زمانی (ثانیه)
بالا ده	۸۵	٦/۱	۰/۳٤۱۳	۰/۰۱۹
اهر	۸۲/٦٤	٦/۲	۰/۲۳۹۵	۰/۰۱۹
منجیل	۵۳	۷/۷	۰/٦۳۵۳	۰/۰۰۵
زنجیران	٦٤	۵/۹	۱/۰۰٦۲	۰/۰۱۹
طبس	٤۸/۷۳	۷/٤	۰/۸٤٦۱	۰/۰۰۵
بم	٦٦/۵۵	٦/۵	۰/۷۹۹۱	۰/۰۲
سرپل ذهاب	۷۹/۹۵	۷/۳	۰/٦۹۷۷	۰/۰۲



شکل ۷ نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات قاب پین فیوز شش طبقه

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، هرکدام از قاب‌ها تحت اثر هفت رکورد زلزله مقیاس شده قرار گرفت. مدت‌زمان تحلیل و اثر رکوردهای زلزله، ۱۵۰ ثانیه (برای اطمینان از ایجاد تغییرات ماندگار پس از وقوع زلزله) در نظر گرفته شد. باتوجه‌به اینکه تحلیل صورت‌گرفته غیرخطی است، پس از اخذ نتایج از نرم‌افزار و انتقال آن به برنامه اکسل، خروجی‌های زیر برای مقایسه عملکرد لرزه‌ای دو قاب مورداستفاده قرار گرفت.

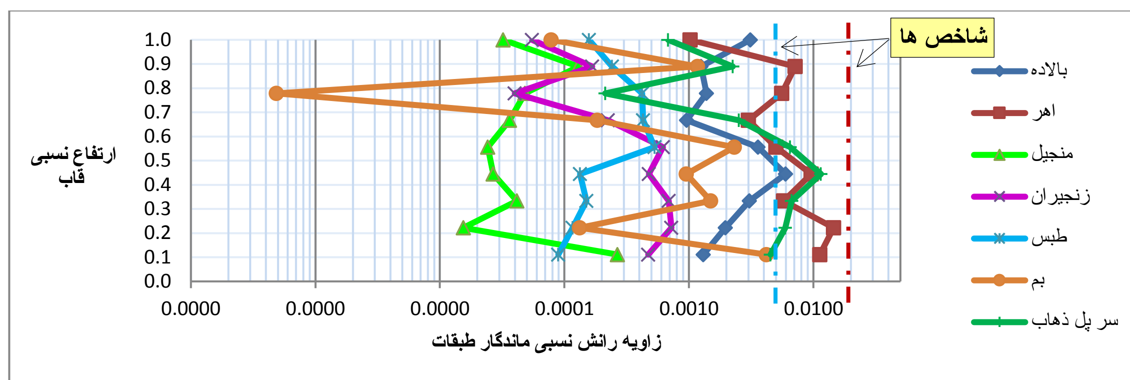
- زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات
- حداکثر دوران فیوزهای قاب در طبقات (فیوز دهانه E-F قاب)
- کرنش مهاربند و لغزش فیوز مهاربند در دو قاب (مهاربند دهانه A-B قاب)

مقایسه زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات

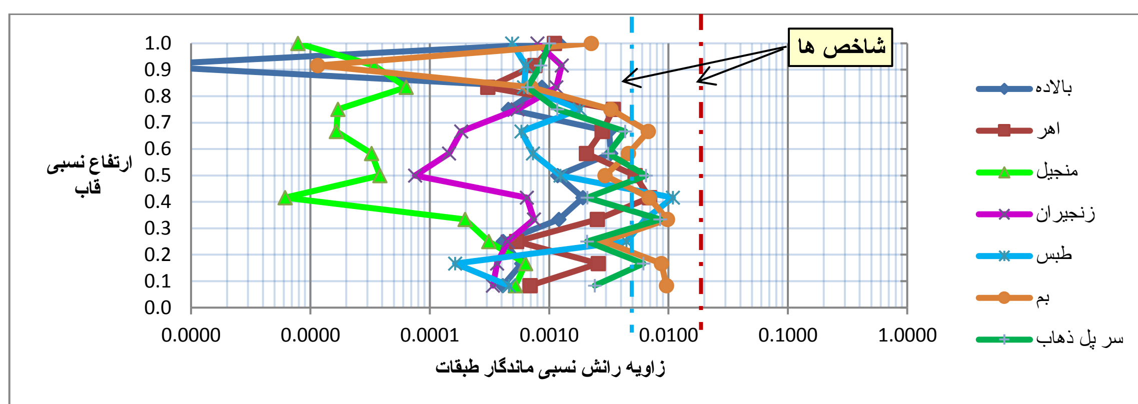
یکی از متغیرهای مهم در تحلیل غیرخطی سازه‌ها، زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات است. این متغیر بیانگر میزان خرابی سازه و پایداری ساختمان پس از زلزله است. بر اساس جدول (ت-٤) نشریه شماره ۳٦۱ [20]، برای سطح عملکرد ایمنی جانی، میزان زاویه رانش نسبی ماندگار مجاز قاب خمشی فولادی مهاربندی‌شده، برابر با ۰/۵ درصد تعیین شده‌است. هم‌چنین برای سطح عملکرد آستانه فروریزش، حداکثر مقدار زاویه رانش نسبی ماندگارطبقات، ۲ درصد تعیین شده‌است. لذا در تفسیر نتایج این بند، ضوابط بیان‌شده از نشریه ۳٦۱ موردتوجه قرار گرفته‌است. در شکل (۷)، شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات برای قاب پین فیوز شش، نه و دوازده طبقه و درشکل (۱۰)،شکل (۱۱) وشکل (۱۲) به‌ترتیب، نمودار حداکثر زاویه دریفت طبقات برای قاب مهاربندی‌شده ویژه شش، نه و دوازده طبقه نشان داده شده‌است.

درشکل (۷) تا شکل (۱۲)، شاخص به رنگ آبی (روشن)، زاویه رانش نسبی ماندگار مجاز برای سطح عملکرد ایمنی جانی و شاخص به رنگ قرمز (تیره)، حداکثر زاویه رانش نسبی ماندگار را، برای سطح عملکرد آستانه فروریزش نشان می‌دهد.

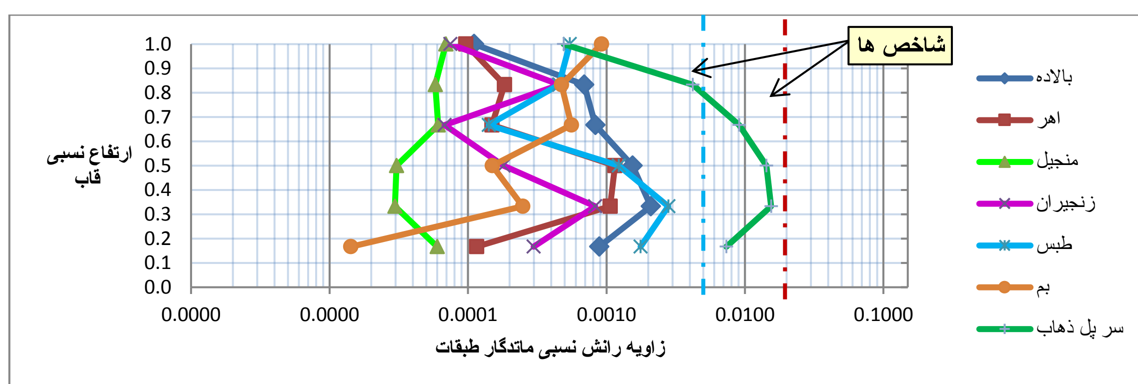
جدول (۵) مقایسه دو قاب را از لحاظ زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات، نشان می‌دهد.



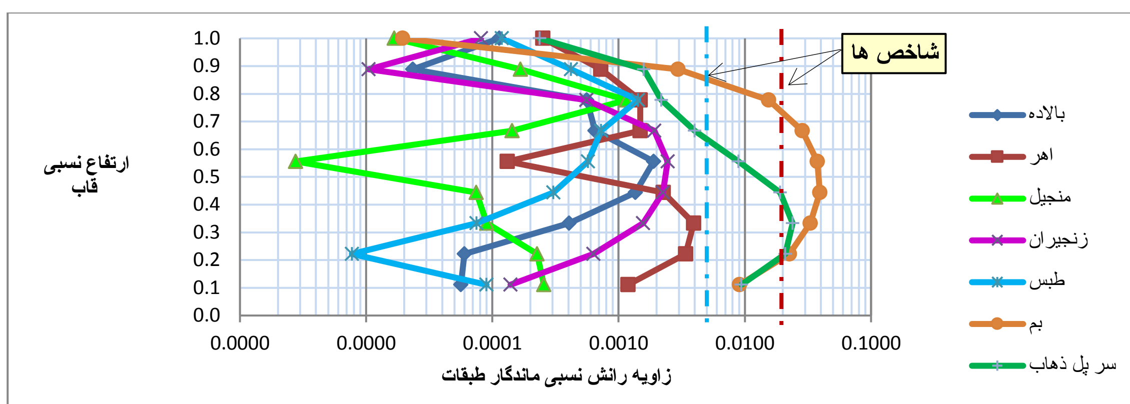
شکل ۸ نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات قاب پین فیوز شش طبقه نه طبقه



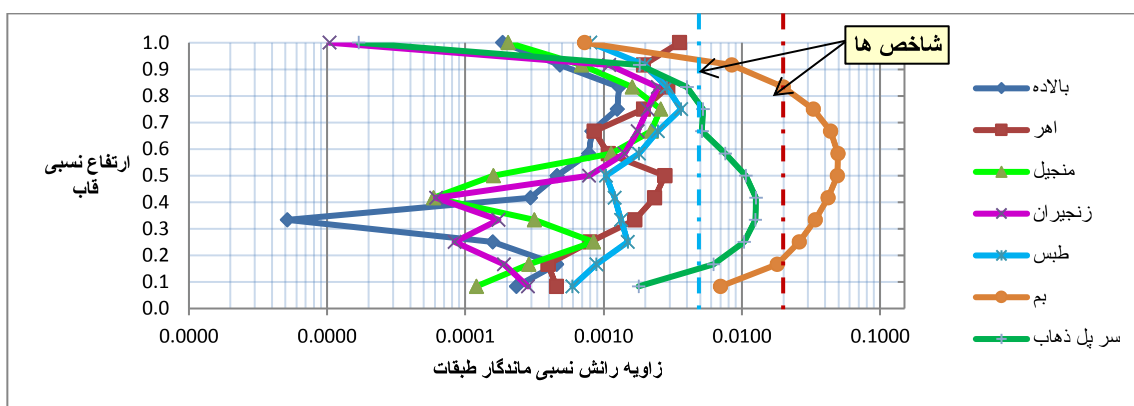
شکل ۹ نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات قاب پین فیوز دوازده طبقه



شکل ۱۰ نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات قاب مهاربندی‌شده ویژه شش طبقه



شکل ۱۱ نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات قاب مهاربندی‌شده ویژه نه طبقه



شکل ۱۲ نمودار زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات قاب مهاربندی‌شده ویژه دوازده طبقه

جدول ۵ مقایسه زاویه رانش نسبی ماندگار طبقات دو گروه قاب

	قاب ٦ طبقه	قاب ۹ طبقه	قاب ۱۲ طبقه
سطح ایمنی جانی تأمین‌شده در قاب پین فیوز (درصد)	٧٦	۸۷	۸۸
سطح ایمنی جانی تأمین‌شده در قاب ویژه (درصد)	۹۰	۸۱	۸۰
احتمال فروریزش قاب پین فیوز (درصد)	۰/۰	۰/۰	۰/۰
احتمال فروریزش قاب ویژه (درصد)	۰/۰	۱۱	۱۱

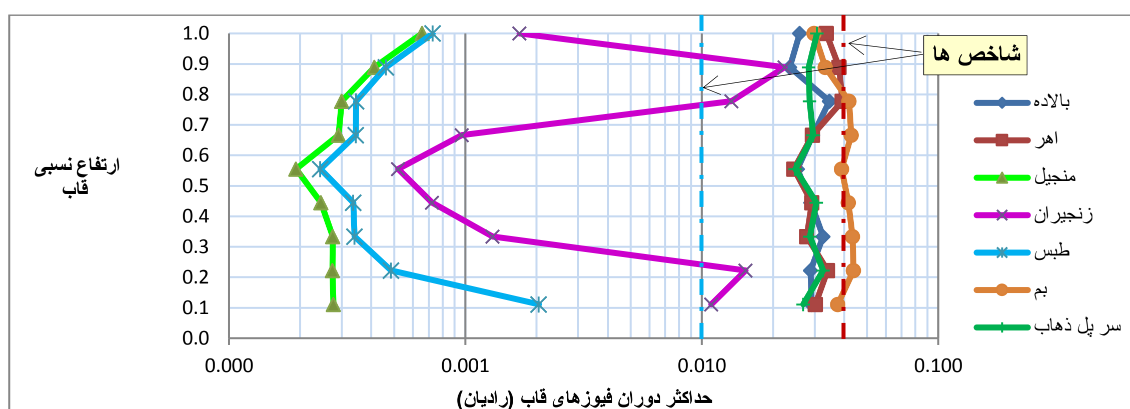
جدول (۵) نشان می‌دهد که قاب مهاربندی‌شده پین فیوز با افزایش طبقات، سطح عملکرد ایمنی جانی بالاتری در برابر قاب مهاربندی‌شده ویژه خواهد داشت.

جدول (۵) بیانگر این است که با افزایش طبقات، تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی در قاب مهاربندی‌شده پین فیوز افزایش یافته و از مقدار ٧٦ درصد در قاب شش طبقه به مقدار ۸۸ درصد در قاب دوازده طبقه رسیده‌است. اما در قاب مهاربندی‌شده ویژه، سطح عملکرد ایمنی جانی کاهش‌یافته و از مقدار ۹۰ درصد در قاب شش طبقه به مقدار ۸۰ درصد در قاب دوازده طبقه رسیده‌است.

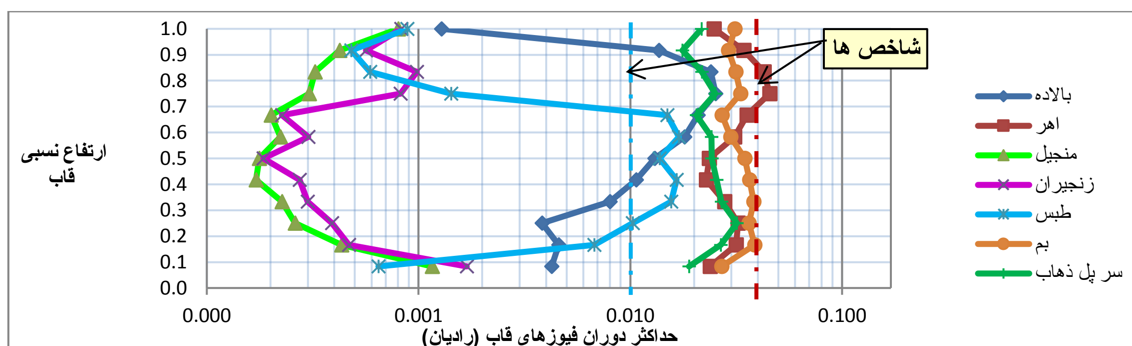
علاوه بر این، با توجه به جدول (۵) فروریزش ساختمان دارای قاب مهاربندی شده پین فیوز تحت اثر زلزله‌های انتخاب شده، رخ نخواهد داد. در مقابل احتمال فروریزش ساختمان دارای قاب مهاربندی شده ویژه، تحت اثر زلزله‌های مشابه، برابر با ۱۱ درصد است. در جدول (۵) محاسبه سطح عملکرد ایمنی بر مبنای درصد، نسبت به داده‌های کمتر از شاخص آبی نمودار به کل داده‌ها و محاسبه احتمال فروریزش قاب بر مبنای درصد، نسبت داده‌های بیشتر از شاخص قرمز نمودار به کل داده‌ها هست.

مقایسه حداکثر دوران فیوزهای خمشی قاب

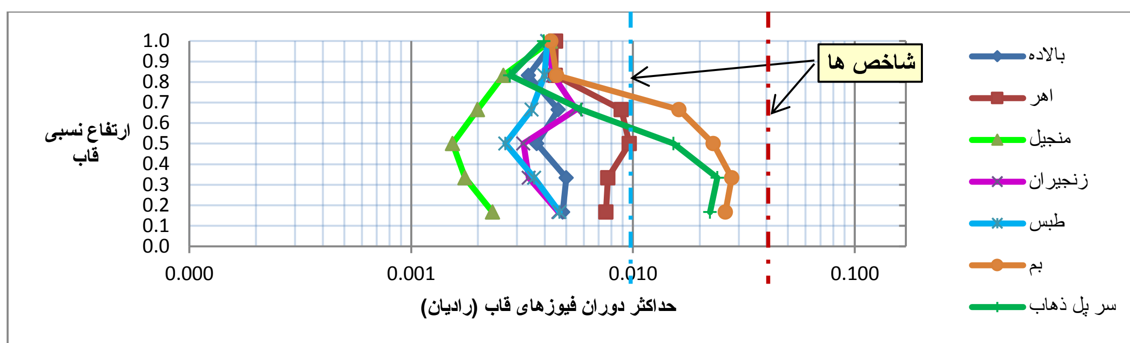
انرژی زلزله در سازه، نسبت مستقیمی با فعال شدن فیوزهای سازه (ناشی از دوران فیوزهای خمشی) دارد، لذ ا در این بخش، حداکثر میزان چرخش فیوزهای طبقات دو قاب در یک دهانه با همدیگر مقایسه شد. بر اساس بند ۱۰-۳-۹ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [18] تامین حداقل ظرفیت دورانی ۰/۰٤ رادیان برای قاب های خمشی ویژه پیشنهاد شده است که مقدار۰/۰۳ رادیان آن باید در ناحیه فرا ارتجاعی باشد. باتوجه به موارد بیان شده حداقل زاویه فعال شدن فیوزها در دو قاب برابر با۰/۰۱ رادیان در نظر گرفته شد. در شکل (۱۳)، شکل (١٤) و شکل (۱۵) نمودار حداکثر دوران فیوز برای قاب های پین فیوز و در شکل (١٦)، شکل (۱۷) و شکل (۱۸)، نمودار حداکثر دوران فیوز برای قاب های مهاربندی شده ویژه ارائه شده است.



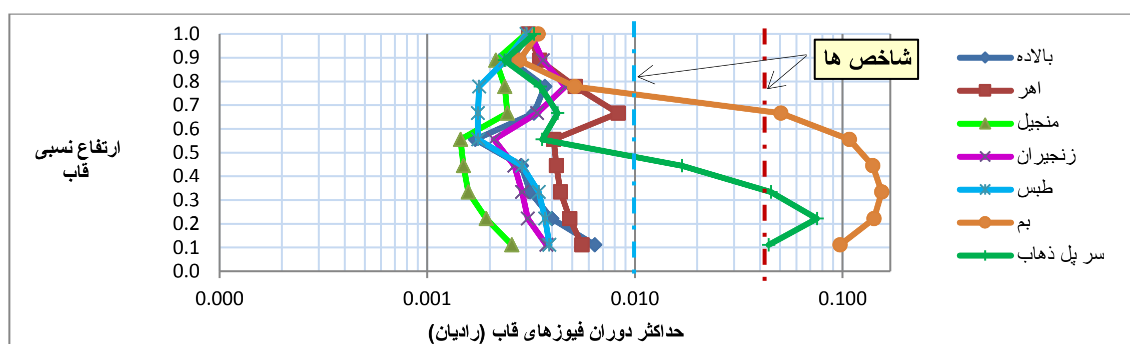
شکل ۱۳ نمودار حداکثر دوران فیوزهای خمشی قاب پین فیوز نه طبقه



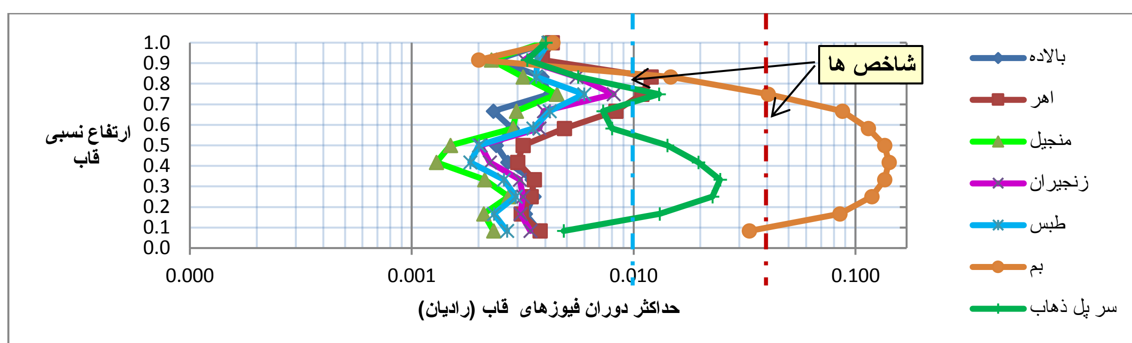
شکل ١٤ نمودار حداکثر دوران فیوزهای خمشی قاب پین فیوز دوازده طبقه



شکل ۱۵ نمودار حداکثر دوران فیوزهای خمشی قاب مهاربندی‌شده ویژه شش طبقه



شکل ۱٦ نمودار حداکثر دوران فیوزهای خمشی قاب مهاربندی‌شده ویژه نه طبقه



شکل ۱۷ نمودار حداکثر دوران فیوزهای خمشی قاب مهاربندی‌شده ویژه دوازده طبقه

درشکل (۱۳) تا شکل (۱۸) شاخص به رنگ آبی (روشن)، زاویه دوران فعال شدن فیوزهای قاب و شاخص به رنگ قرمز (تیره)، مرز ۰/۰٤ رادیان دوران فیوزها را نشان می‌دهد. جدول (٦) مقایسه دو قاب را از لحاظ فعال شدن فیوزهای قاب، نشان می‌دهد. از جدول (٦) این نتیجه استنباط می‌شود که قاب پین فیوز عملکرد بسیار بهتری نسبت‌به قاب مهاربندی‌شده ویژه در خصوص فعال شدن فیوزها و اتلاف انرژی زلزله دارد. همان‌طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، یکی از اهداف به‌کار بردن فیوز در سازه‌ها، اتلاف انرژی زلزله در فیوزها و عدم آسیب رسیدن به بخش‌های دیگر سازه است. این هدف با فعال شدن فیوزها و تبدیل‌شدن فیوزها به یک مفصل پلاستیک، تحقق پیدا می‌کند. جدول (٦) نشان می‌دهد که درصد فعال شدن فیوزهای تیر و تحقق بند ۱۰-۳-۹ مبحث دهم در قاب پین فیوز، چهار برابر قاب مهاربندی‌شده ویژه است.

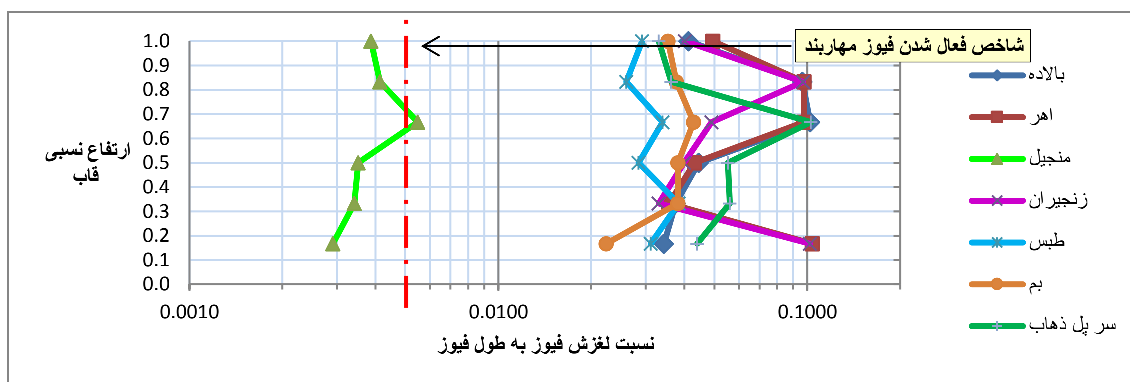
مقایسه عملکرد مهاربندهای دو قاب

بر اساس بند ۱۰-۳-۱۱ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [18]، در قاب خمشی مهاربندی‌شده همگرای ویژه، مهاربند تحت اثر نیرو جانبی زلزله، باید در شرایط فرا ارتجاعی قرار بگیرد. در قاب پین فیوز، با لغزش فیوز مهاربند (بدون آسیب رسیدن به مهاربند) و در قاب مهاربندی‌شده ویژه، با کمانش و جاری شدن مهاربند، این امر تحقق پیدا می‌کند. نمودار لغزش فیوز مهاربند در قاب‌های پین فیوز در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) و نمودار جاری شدن مهاربند در قاب مهاربندی‌شده ویژه در شکل‌های (۲۲) تا (۲٤) نشان داده شده‌است.

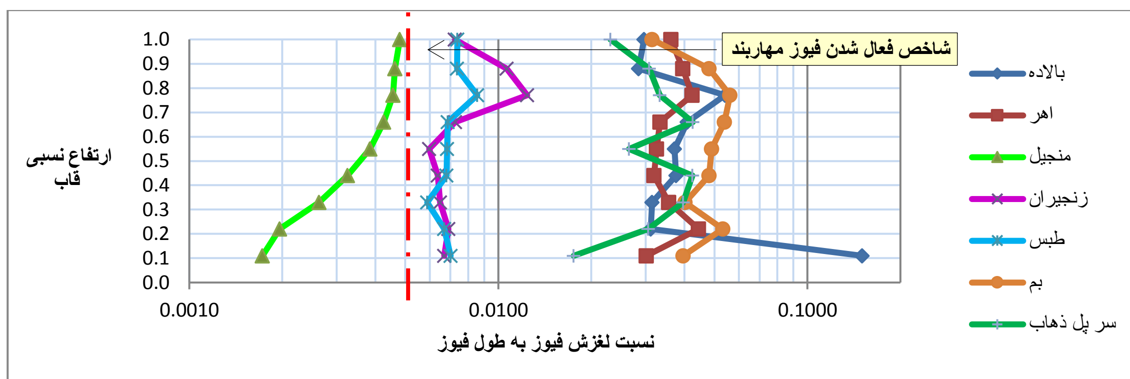
در شکل (۱۹) تا شکل (۲۱) شاخص قرمزرنگ، بیانگر فعال شدن فیوز اصطکاکی لغزشی مهاربند در قاب پین فیوز است. برای اطمینان از فعال شدن فیوز مهاربند، نسبت لغزش فیوز به طول فیوز، حداقل برابر با ۰/۰۰۵ (چهار برابر کرنش جاری شدن فیوز مهاربند) در نظر گرفته شد. در شکل (۲۲) تا شکل (۲٤) شاخص آبی‌رنگ بیانگر جاری شدن مهاربند در قاب مهاربندی‌شده ویژه است. برای اطمینان از جاری شدن مهاربند، حداقل کرنش جاری شدن مهاربند، چهار برابر کرنش متناظر با تنش جاری شدن مهاربند، (۰/۰۰۵)، در نظر گرفته شد.

جدول ٦ مقایسه فعال شدن فیوزهای خمشی دو گروه قاب

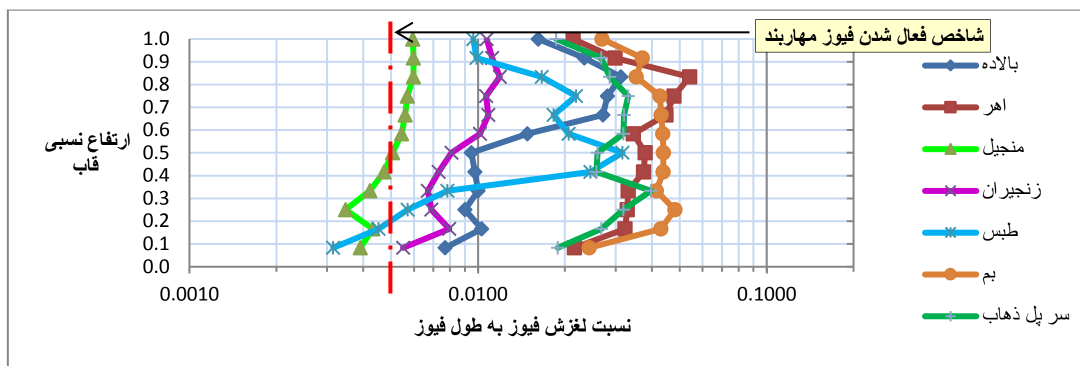
	قاب ٦ طبقه	قاب ۹ طبقه	قاب ۱۲ طبقه
میزان فعال‌شدن فیوز خمشی در قاب پین فیوز (درصد)	۸٦	٦۳	۵۷
میزان فعال‌شدن فیوز خمشی در قاب ویژه (درصد)	۱۷	۱٦	۲۱



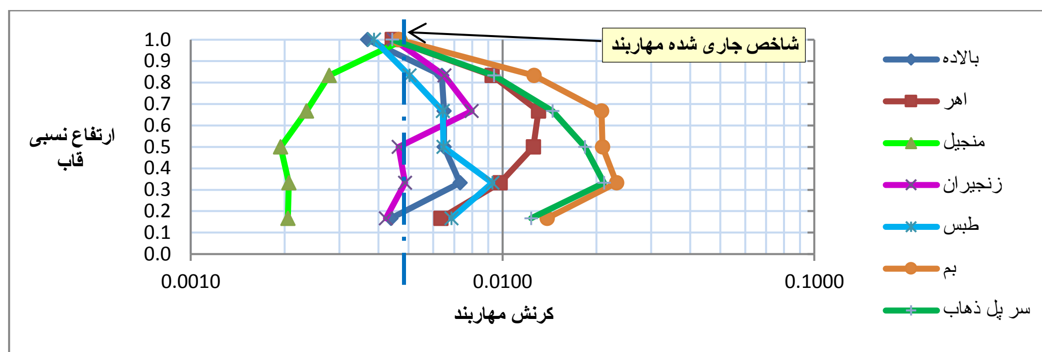
شکل ۱۸ نمودار لغزش نسبی فیوز مهاربند در قاب پین فیوز شش طبقه



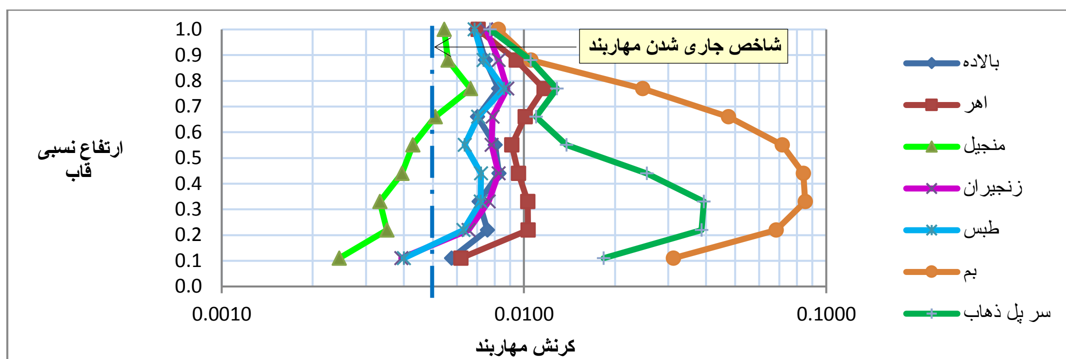
شکل ۱۹ نمودار لغزش نسبی فیوز مهاربند در قاب پین فیوز نه طبقه



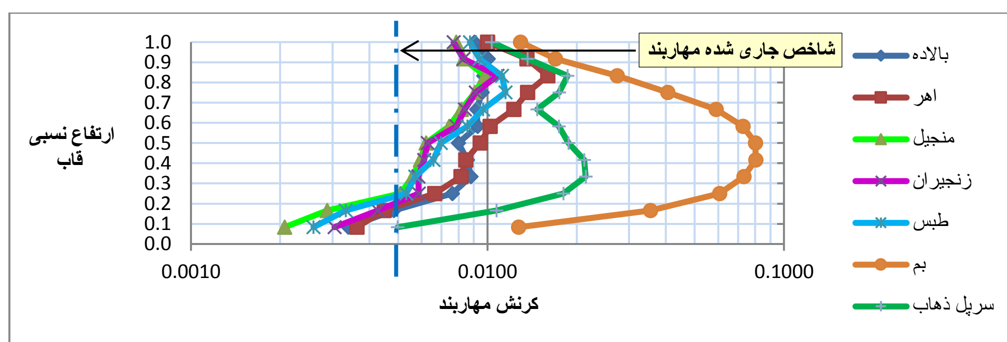
شکل ۲۰ نمودار لغزش نسبی فیوز مهاربند در قاب پین فیوز دوازده طبقه



شکل ۲۱ نمودار جاری شدن مهاربند در قاب مهاربندی‌شده ویژه شش طبقه



شکل ۲۲ نمودار جاری شدن مهاربند در قاب مهاربندی‌شده ویژه نه طبقه



شکل ۲۳ نمودار جاری شدن مهاربند در قاب مهاربندی‌شده ویژه دوازده طبقه

با نگاهی به شکل‌های (۱۹) تا شکل (٢٤) این نتیجه استنباط می‌شود که در هر دو قاب به‌غیراز زلزله منجیل، پدیده فعال شدن فیوز اصطکاکی لغزشی مهاربند (در قاب پین فیوز) و جاری شدن مهاربند (در قاب مهاربندی‌شده ویژه) در تمام طبقات رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

باتوجه‌به مقایسه صورت‌گرفته، برتری قاب مهاربندی‌شده پین فیوز، ازلحاظ فعال‌شدن غالب فیوزهای تیر و مهاربند و اتلاف انرژی زلزله از طریق فیوزهای مزبور، تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی ۸۰ درصدی پس از وقوع زلزله و احتمال ناچیز فروریزش سازه بر اساس سطح عملکرد آستانه فروریزش، نسبت‌به قاب مهاربندی‌شده ویژه مشهود است. در مقابل، افزایش هزینه اجرای سازه (بالا بودن هزینه ساخت فیوزهای اصطکاکی) از معایب قاب مهاربندی‌شده پین فیوز است.

هم‌چنین موضوعات ذیل برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

- مکان‌یابی بهینه فیوزهای اصطکاکی در قاب مهاربندی‌شده پین فیوز
- تعیین ضریب رفتار قاب مهاربندی‌شده پین فیوز
- بررسی کارایی مهاربند دارای فیوز اصطکاکی، در به‌سازی سازه‌های فولادی
- مقایسه عملکرد لرزه‌ای مهاربند دارای فیوز اصطکاکی با مهاربند متصل به میراگر تسلیمی

مراجع

1. R. Park and T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons, Inc, (1975).
2. Hoseyni M., Rohanimanesh S., Taremi M., "Development and application of the idea of fuses in the seismic design of structures", *2nd International Congress on Structure, Architectureand Urban Development, Tabriz* , Iran , (2014), In Persian.
3. American Institute of Steel Construction, "AISC seismic provisions for structural steel buildings (AISC 341-05) ", Chicago (IL), (2005).
4. BHRC, "Iranian Code of Practice for seismic Resistant Design of Buildings: Standard No. 2800 (4rd Edition) ", Building and Housing Research Center, (2015), (In Persian).
5. Moradi Garoosi A., Tahamouli Roudsari M., Hosseini Hashemi B., "Experimental Evaluation of Rigid Connection with Reduced Section and Replaceable Fuse", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, Vol 5, No 16, pp 126-137, (2018), In Persian.
6. A. S. Pall, C. MARSH, "Response of friction damped braced frames", *Journal of the Structural Division American society of the Civil Engineers*, Vol. 108, No. 6, pp. 75-92, (1982).
7. ZahraI S.M., AlaeI H., "Response modification factor for dual system of medium ductility steel moment frame concentric with pall friction damper", *Sharif Journal of Civil Engineering*, Vol 31, No 4, pp 91-99, (2016), In Persian.
8. E. Popov, C. E. Grigorian, "Slotted Bolted Connection Energy Dissipators", Earthquake Engineering Research Center, Report No.UCB/EERC-92/10, (1992).
9. I. H. Mualla, B. Belev, "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake

excitation", *Engineering Structures*, Vol. 24, N. 3, p. 365-371, (2002)

10. Shahazi M., Damghani A., "Investigating the performance of friction dampers in convergent braced frames and comparing it with divergent braced frames", *2nd national conference on new materials and structures, Isfahan*, Iran, (2013), (In Persian).
11. Hadianfard M.A., "Rehabilitation of Steel Structures by Using the Rotational Friction Dampers", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, Vol 26, No 2, pp 152-162 , (2015), (In Persian).
12. M. Sarkisian, N. Mathias, R. Garai and C. Uang, "Pin-Fuse Frame™: Full Scale Tests", in Structural Engineering Association of California (SEAOC), Las Vegas, Nevada, USA, (2011).
13. M. Sarkisian, N. Mathias, R. Garai and C. Horiuchi, "Improving Seismic Resilience Using Structural Systems with Friction-Based", in AEI 2017, Oklahoma, 11–13, (2017).
14. karim Abadi M., Naghipur M., " Investigating the coefficient of behavior in moment frames with pin fuse pin connection", *3nd national conference on recent innovations in civil engineering, architecture and urban planning*, Tehran, Iran, (2016), (In Persian).
15. Rezaei R., Naghipur M., "Comparison of the moment curve - rotation of connection of beam to column pin fuse and RBS in steel structures", *The first national conference on civil engineering and sustainable development*, Tehran, Iran, (2014), (In Persian).
16. M. Sarkisian, R. Garai, B. Johnson, "Mass-Timber Structures—Increased Ductility through Friction Mechanism", in AEI 2019, Virginia, (2019).
17. National Science Foundation-sponsored Pacific Earthquake Engineering (PEER) Center, "OpenSees", National Science Foundation-sponsored Pacific Earthquake Engineering (PEER) Center, 01 01 1990-2021, [Online], Available: https://opensees.berkeley.edu , ver 2.4.6.
18. MHUD, "Iranian National Building Code, Part 10, Steel Structure Design", Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran, (2013), (In Persian).
19. BHRC, "Iran Strong Motion Network".(1973)
20. Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System, "Commentary of Instruction for seismicRehabilitation of Existing Buildings", NO: 361, (2009), (In Persian).